



Automatización en la carga de material de fundición en una línea de maquinado

Automation in the loading of foundry material in a machining line

Hernández Núñez Mario , Barraza Navarro Francisco Javier

CIATEQ Centro de Tecnología Avanzada, circuito de la industria poniente No 11 Lote 11 Mz. 3, parque industrial ex hacienda, Lerma de Villada Estado de México, C.P 52004.

Autor de correspondencia: Mario Hernández Núñez, CIATEQ Centro de Tecnología Avanzada, circuito de la industria poniente No 11 Lote 11 Mz. 3, parque industrial ex hacienda, Lerma de Villada Estado de México, C.P. 52004. E-mail: mario.hernandeznunez@gm.com

Recibido: 28 de Junio del 2018

Aceptado: 15 de Enero del 2019

Publicado: 15 de Mayo del 2019

Resumen. - *Este artículo describe la forma de cómo fue diseñado mecánicamente un manipulador cartesiano de tres grados de libertad, también de la manera de cómo fue diseñada la trayectoria y la determinación de las fuerzas necesarias para originar el movimiento. Se consideró estudiar la geometría del movimiento del manipulador con el fin de definir trayectorias, específicamente se usó el método de Denavit-Hartenberg también se empleó la ecuación de Euler-Lagrange para determinar las fuerzas internas que suceden dentro del sistema. Se determinaron las características técnicas de los componentes del manipulador empleando un software y mediante un proceso iterativo de análisis de esfuerzos, deformaciones y fatigas se eligieron las propuestas más viables.*

Palabras clave: Diseño de Concepto; Diseño de Detalle; Cinemática Directa; Dinámica; Manipulador Cartesiano; Diseño Mecánico Usando Software.

Abstract. - *This article describes the way how a Cartesian manipulator of three degrees of freedom was mechanically designed, as well as the way in which the trajectory was designed and the forces needed to originate the movement. It was considered to study the geometry of the manipulator's movement in order to define trajectories, specifically the Denavit-Hartenberg method was used, and the Euler-Lagrange equation was also used to determine the internal forces that occur within the system. The technical characteristics of the components of the manipulator were determined using software and through an iterative process of analysis of stress, deformations and fatigues, the most viable proposals were chosen.*

Keywords: Concept Design; Detail Design; Direct Kinematics; Dynamic; Cartesian Manipulator; Mechanical Design Using Software.



1. Introducción

En una línea de maquinado de cabezas de cilindros para motores de combustión interna, existe una persona en la entrada de la línea que se encarga de abastecerla de material casting de una forma totalmente manual. Se pretende automatizar la actividad mediante el empleo de un manipulador. Para el diseño del manipulador es necesario el estudio de su movimiento empleando expresiones matemáticas con el fin de diseñar trayectorias en un contexto formal que a su vez servirán como base para la programación de su controlador; el empleo de la metodología Denavit-Hartenberg [1] es un método muy conveniente para lograrlo. Dentro del diseño mecánico para determinar las características técnicas de los componentes se requiere encontrar todas las fuerzas presentes, para lo cual se emplean los análisis

estáticos y dinámicos, para este último el uso de la ecuación de Euler-Lagrange [1] es un método muy adecuado. El empleo de un software de diseño nos ayuda a ahorrar tiempo y el nivel de efectividad dependerá de la calidad de los datos que se ingresen al sistema para la ejecución de las simulaciones de esfuerzos, deformaciones y fatigas.

2. Diseño de concepto

Se construye la idea de la automatización a nivel de concepto. Se inicia enlistando los requerimientos del cliente y se continúa con la identificación de las funciones que debe de cumplir el manipulador. La figura 1 es una representación física de la condición actual.

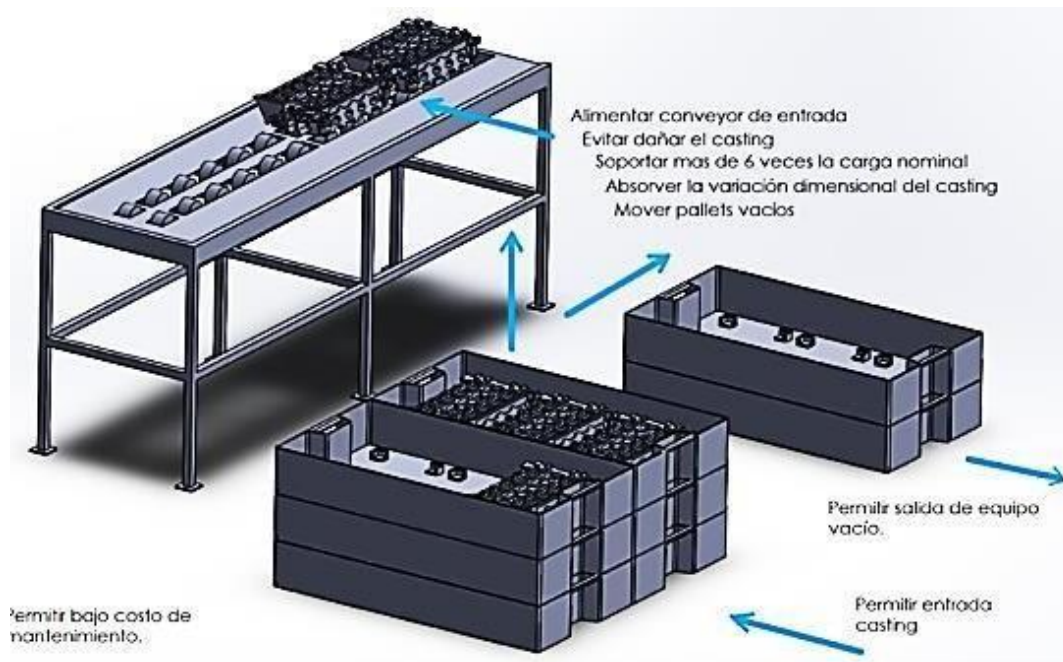


Figura 1. Representación física de la condición actual.

La propuesta que más se ajusta al cumplimiento de las funciones, consiste en un manipulador que se moverá en tres ejes y de forma lineal para abarcar todo el espacio de trabajo, el movimiento será desde la toma del casting hasta el posicionamiento en la banda transportadora de la entrada del proceso.

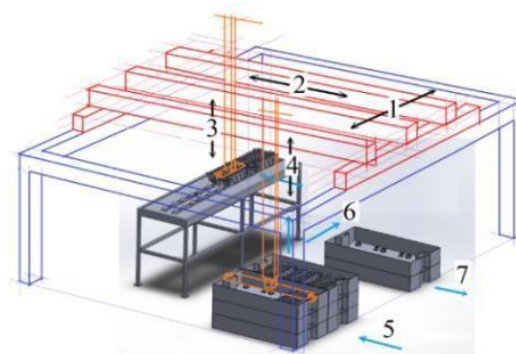


Figura 2. Banda transportadora de entrada.



Una agarradera (“gripper”) con la geometría adecuada, tomará el casting en el área de material almacenado y lo dejará en la banda transportadora de la entrada al proceso (ver la flecha identificada con el número 3 en la figura 2). Una segunda agarradera con la geometría adecuada tomará las charolas vacías del casting y las dejará en el área de equipo vacío (ver las flechas identificadas con los números 4 y 5 de la figura 2). La entrada y salida del casting será por los lugares identificados con las flechas 5 y 7 respectivamente.

3. Diseño de detalle

Para determinar las características técnicas de los componentes del manipulador, se realiza un análisis de los esfuerzos, las deformaciones y las fatigas mediante el software SolidWorks. Se realiza un mínimo de tres propuestas en CAD para cada componente mecánico, posteriormente se desarrolla el análisis CAE de cada propuesta, se generan gráficos de esfuerzo, deformación unitaria,

desplazamiento y factor de seguridad los cuales emplean el criterio de Von Mises [2]. Para el análisis de la fatiga se toman las propuestas CAD y se simulan a los ciclos de vida pronosticados, se generan gráficos de los ciclos de vida y el porcentaje de daño. Al final de los análisis CAE se elabora una tabla comparativa que incluye las propuestas CAD, los resultados de esfuerzos, los desplazamientos, los factores de seguridad y los ciclos de vida. En la misma tabla se valora si la propuesta es o no viable tomando como referencia los requerimientos del cliente. Para ejemplificar y por razones de espacio, en este artículo solo se muestran las simulaciones y la determinación de las características técnicas de un solo componente el cual es el de la base de la agarradera que toma las piezas casting. De la figura 3 a la figura 6 se muestran las simulaciones CAE para las 4 propuestas que se plantearon, la tabla 1 muestra la recopilación de los resultados.

Tabla 1. Resultados del CAE.

	Esfuerzo mayor (Mpa)	Desplazamiento mayor (mm)	Factor mínimo de seguridad	Ciclos de vida ($\times 10^6$)	¿Cumple con los requerimientos del cliente ?	Observaciones
Propuesta 1	8.147	0.06223	30.68	Vida infinita	Parcialmente	Factor de seguridad alto y deformación aceptable.
Propuesta 2	14.13	0.1254	17.69	Vida infinita	SI	Factor de seguridad y deformación aceptables.
Propuesta 3	15.43	0.1817	16.2	Vida infinita	SI	Factor de seguridad y deformación aceptables, menor peso que propuesta no. 2.
Propuesta 4	148.8	4.335	1.68	Vida infinita	NO	Factor de seguridad no cumple requerimiento

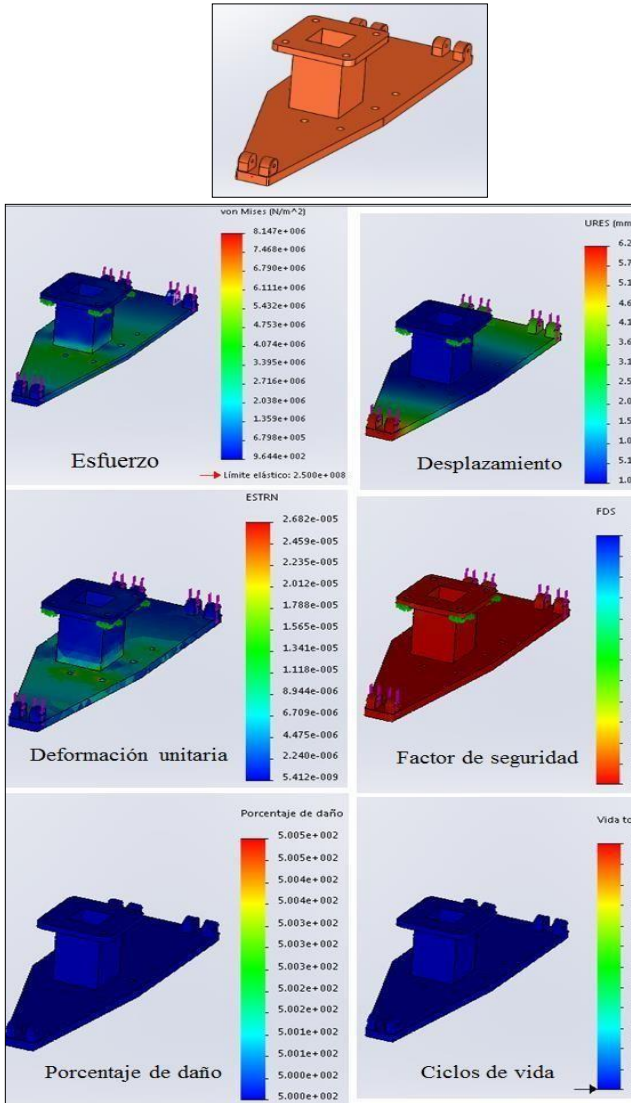


Figura 3. CAE para la propuesta 1.

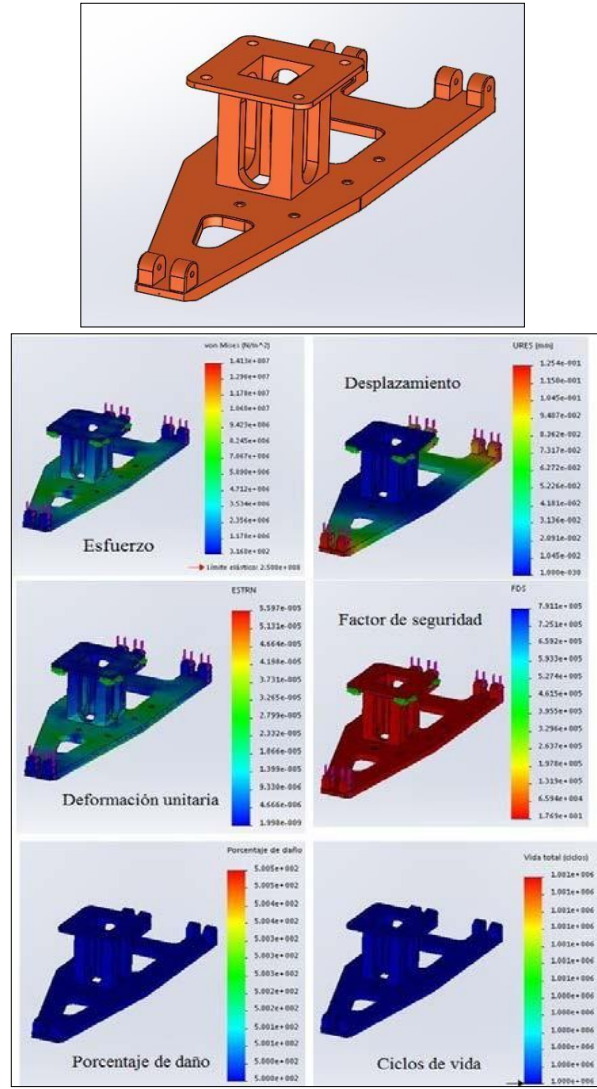


Figura 4. CAE para la propuesta 2.

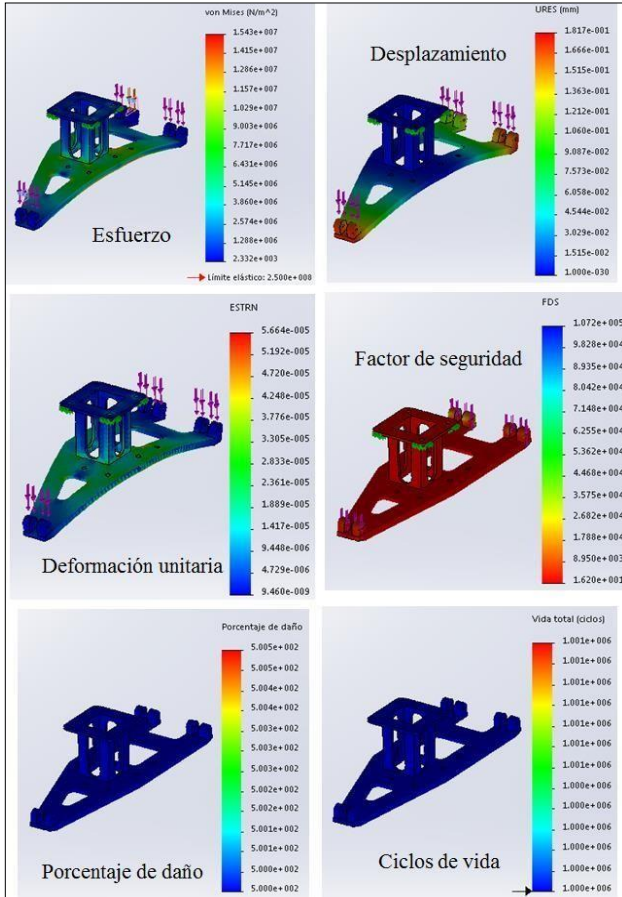
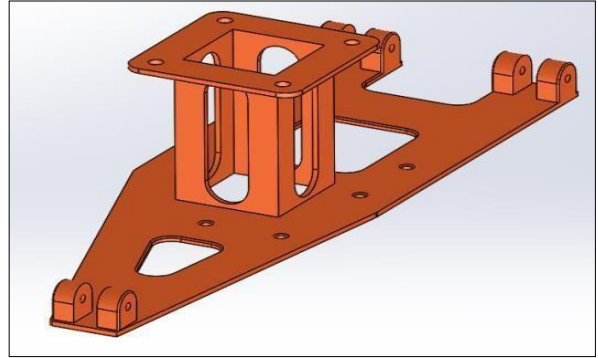
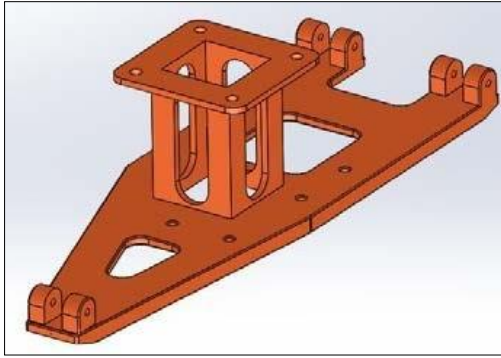


Figura 5. CAE para la propuesta 3

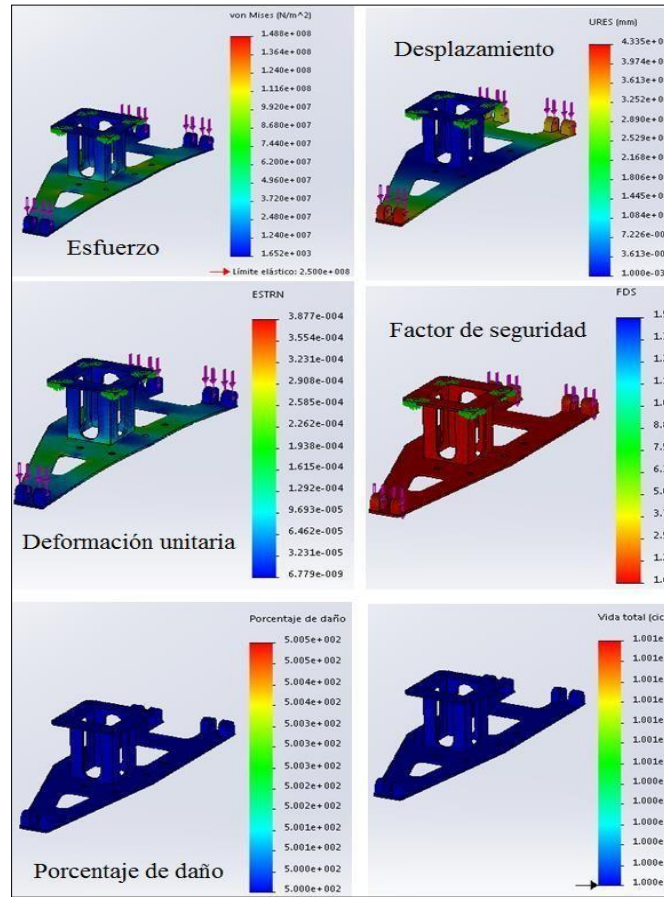


Figura 6. CAE para la propuesta 4.

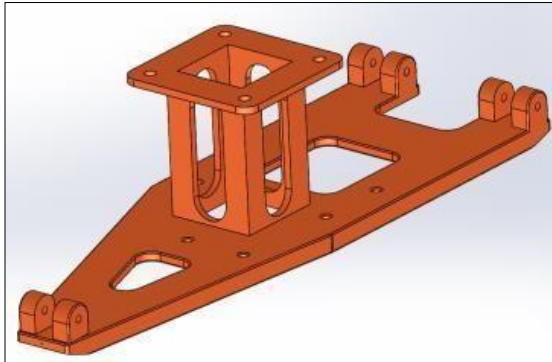


Figura 7. Resultado CAD de la parte.

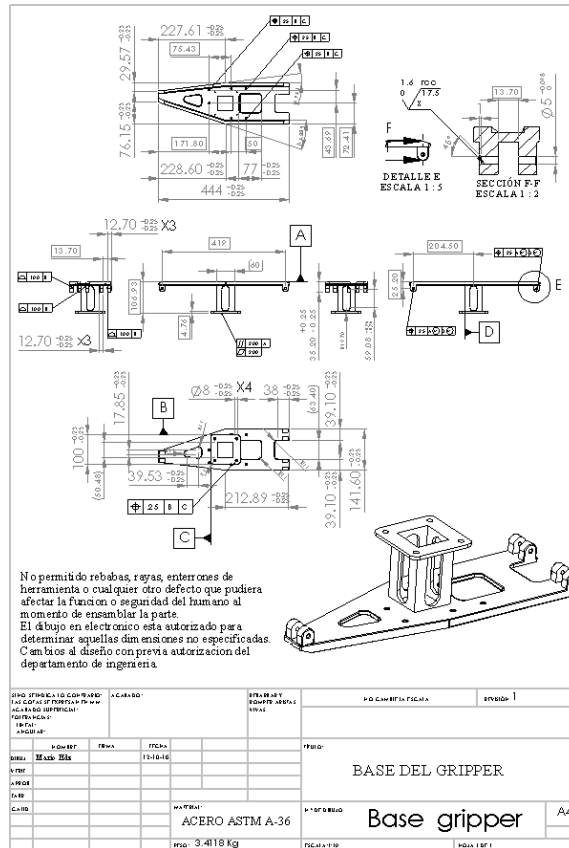


Figura 8. Diseño mecánico de la parte con las especificaciones técnicas.

Al observar los resultados de la propuesta 1, se puede notar que el desplazamiento o deformación mayor es de 62 micras y que además el componente nunca se romperá porque alcanzará los 1×10^6 ciclos de trabajo, lo que significa que la propuesta 1 es una buena alternativa de diseño, sin embargo, el factor de seguridad está muy elevado lo que se traduce en mayor peso y mayores costos. Los resultados de las propuestas 2 y 3 son muy parecidos, estas opciones cumplen con los requerimientos del cliente en cuanto a deformación, factor de seguridad y ciclos de vida; la propuesta 3 por tener menor peso se considera una propuesta de diseño más viable que la propuesta 2. La propuesta 4 queda descartada por la excesiva deformación con un valor máximo de 4.33 mm. Por

lo tanto, la propuesta 3 es la opción de diseño más viable, la figura 7 muestra el CAD de la parte y la figura 8 muestra el diseño mecánico con las especificaciones técnicas.

4. Cinemática directa del manipulador

El principal objetivo de este análisis es el de poder diseñar trayectorias para la programación en el controlador [1]. En esta parte se estudia la geometría del movimiento sin considerar las fuerzas que lo producen. Usando los datos de la figura 9 y la tabla 2 además de emplear el método Denavit-Hartenberg, la definición del movimiento queda determinado por la matriz (1).

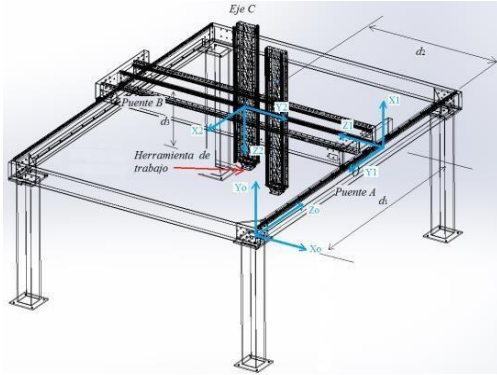


Figura 9. Diagrama para el análisis cinemático

Tabla 2. Parámetros de los eslabones.

Variable	α_i	θ_i	d_i	l_i
Eslabón 1	$-\pi/2$	$\pi/2$	$d1$	Eje puente A
Eslabón 2	$-\pi/2$	$\pi/2$	$d2$	Eje puente B
Eslabón 3	0	0	$d3$	Eje C

$$H_0^3 = H_0^1 H_1^2 H_2^3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -d_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -d_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ -1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

La cinemática directa para el robot cartesiano de tres grados de libertad que nos dice de la posición espacial de la herramienta de trabajo respecto al

origen (“Home”) (x_0, y_0, z_0) de la figura 9, es la expresión (2).

$$d_{13} = \begin{bmatrix} x_{13} \\ y_{13} \\ z_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_2 \\ -d_3 \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

5. Dinámica del manipulador

El estudio de la dinámica del manipulador nos ayuda a determinar la capacidad de los motores que

moverán los ejes. En este análisis usaremos un enfoque energético mediante la ecuación de Euler-Lagrange [1].

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} + v(q, \tau) = \tau \quad (3)$$

Tomando como referencia la figura 10, el Lagrangiano queda definido mediante la ecuación (4)

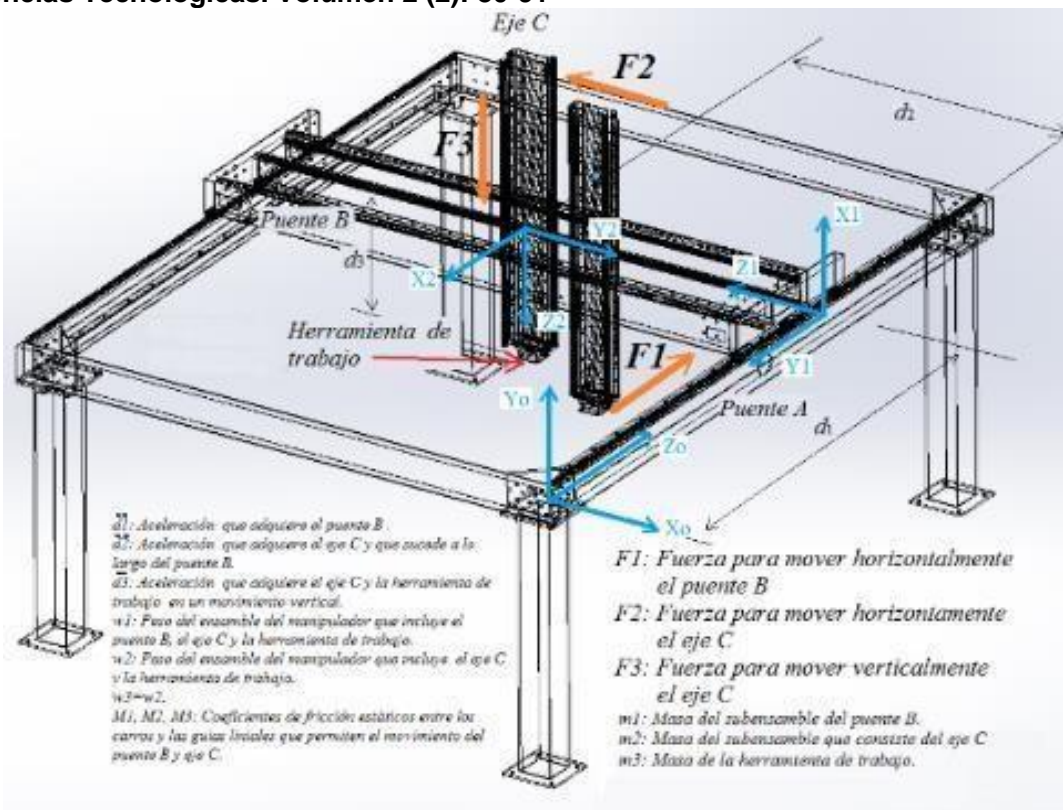


Figura 10. Diagrama para el análisis dinámico.

Resultados

Después de realizar los análisis CAE de todos los componentes y de seleccionar las mejores propuestas

de diseño, se llegó a los datos mostrados en las tablas 3, 4 y al CAD final del manipulador el cual es mostrado en la figura 11.

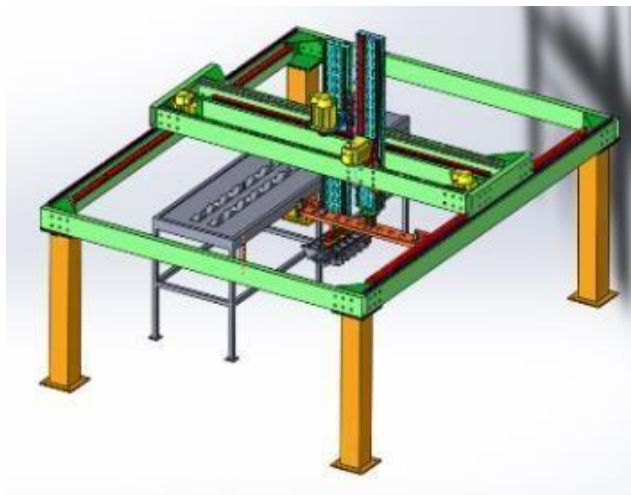


Figura 11. CAD final del manipulador.

$$L = \frac{1}{2}m_1d_1^2 + w_1\mu_1d_1 + \frac{1}{2}m_2(d_2^2 + d_1^2) + w_2\mu_2d_2g + \frac{1}{2}m_3(d_3^2 + d_2^2 + d_1^2) + w_3\mu_3d_3 - m_3d_1g \quad (4)$$

Al desarrollar la ecuación (4) de acuerdo a la ecuación (3), quedan las ecuaciones (5), (6) y (7).



$$F_1 = (m_1 + m_2 + m_3)\ddot{d}_1 + w_1\mu_1 \quad (5)$$

$$F_2 = (m_2 + m_3)\ddot{d}_2 + w_2\mu_2 \quad (6)$$

$$F_3 = (m_3)\ddot{d}_3 + w_3\mu_3 - m_3g \quad (7)$$

Sustituyendo los valores de las masas, pesos (encontrados en la simulación CAE) y coeficientes de fricción en las ecuaciones (5), (6) y (7) se tiene:

$$F_1 = 396.24\ddot{d}_1 + 19.43 \quad (8)$$

$$F_2 = 58.84\ddot{d}_2 + 2.88 \quad (9)$$

$$F_3 = 15.21\ddot{d}_3 - 149.21 \quad (10)$$

Donde F_1 y F_2 son las fuerzas necesarias para mover el puente B y eje C en sentido horizontal y F_3 es la fuerza para mover el eje C de forma vertical. Todas las fuerzas son una función de las aceleraciones d_1 , d_2 y d_3 .

Se considera que un componente mecánico fallará

Tabla 3. Resumen de los resultados CAE de las mejores propuestas de diseño

Componente	Esfuerzo mayor (Mpa)	Desplazamiento mayor (mm)	Factor mínimo de seguridad	Ciclos de vida (1×10^4)
Morzada 1 de sujeción del casting	12.67	0.02304	19.74	Vida infinita
Morzada 2 de sujeción del casting	9.23	0.01679	27.08	Vida infinita
Morzada 3 de sujeción del casting	3.435	0.006248	72.78	Vida infinita
Gripper de sujeción para casting	15.43	0.1817	16.2	Vida infinita
Cople entre gripper y eje vertical movimiento casting	1.168	0.001287	214	Vida infinita
Eje vertical de movimiento casting	10.74	0.005924	23.28	Vida infinita
Cremallera eje movimiento casting	1.8	0.00365	23	Vida infinita
Piñon para el movimiento eje del casting	21.14	0.00067	19.63	Vida infinita
Placa de soporte del motor para el movimiento vertical del casting	21.53	0.05278	11.61	Vida infinita
Eje horizontal de soporte para el eje de movimiento vertical casting	18.11	0.06816	13.81	Vida infinita
Placa soporte del motor para el movimiento horizontal del casting	13.24	0.07879	18.88	Vida infinita
Mordaza del equipo vacío	10.3	0.01748	24.28	Vida infinita
Gripper para el movimiento de equipo vacío	8.31	0.1425	30.08	Vida infinita
Cople entre gripper y eje vertical movimiento charolas	9.24	0.01	27	Vida infinita
Eje vertical de movimiento charolas	16.56	0.00904	15.1	Vida infinita
Piñon para el movimiento eje del casting	27.81	0.000878	14.92	Vida infinita
Placa de acoplamiento y base del motor para las charolas	0.141	0.06065	17.74	Vida infinita

cuando existe alguna de las siguientes condiciones:

- el esfuerzo que se genera dentro del componente mecánico cuando está trabajando sobrepasa el esfuerzo de fluencia del material del que está hecho,
- la máxima deformación del componente alcanza un valor que impide la correcta función de la parte,
- la vida del componente esta por abajo de lo pronosticado. Para el caso específico del manipulador, el cliente necesita que las piezas tengan un factor de seguridad por arriba de 6 unidades, la deformación máxima permitida para que no exista interferencia con el casting debe ser menor de 0.200 mm, y finalmente todos los componentes deben tener vida infinita. Los factores de seguridad y las deformaciones mostradas en las tablas 3 y 4 están dentro de los requerimientos del cliente, lo mismo sucede con los ciclos de vida ya que se encuentran dentro del rango de vida infinita.



Componente	Esfuerzo mayor (Mpa)	Desplazamiento mayor (mm)	Factor mínimo de seguridad	Ciclos de vida (1×10^6)
Eje horizontal de soporte para el movimiento vertical de las charolas	32.11	0.111	7.786	Vida infinita
Eje móvil central vertical y soporte para eje movimiento del casting	22.03	0.04125	11.35	Vida infinita
Placa de escuadra y unión de ejes centrales móviles	4.796	0.003121	52.12	Vida infinita
Soporte lateral horizontal 1 que une los 3 ejes horizontales	19.08	0.01357	13.1	Vida infinita
Soporte lateral horizontal 2 que une los 3 ejes horizontales	17.72	0.01121	14.1	Vida infinita
Viga horizontal corta que sujeta columnas	4.929	0.03588	50.72	Vida infinita
Placas de unión de vigas horizontales extendidas y cortas que sujetan columnas	0.3479	0.000262	718.7	Vida infinita
Columnas principales de la estructura	17.2	0.01275	14.54	Vida infinita
Base del cilindro para movimiento de mordaza de charola	8.1	0.0055	30.86	Vida infinita
Base del cilindro para movimiento de mordaza 1 del casting	13.83	0.0051	18.08	Vida infinita
Base del cilindro para movimiento de mordazas 2 y 3 del casting	6.93	0.00281	36.03	Vida infinita
Horquilla de cilindros neumáticos	5.73	0.00036	43.61	Vida infinita
Soporte cuadrado y base del motor	3.89	0.0171	64.22	Vida infinita
Viga horizontal corta que sujeta columnas.	4.929	0.03588	50.72	Vida infinita
Perno de mordaza para casting	7.232	0.02018	34.57	Vida infinita
Perno sujeción mordaza y horquilla	11.51	0.04285	21.72	Vida infinita
Perno de ensamble entre cilindro y base	2.998	0.01148	83.4	Vida infinita
Perno sujeción base del gripper y mordaza de charolas	3.756	0.002021	66.56	Vida infinita

Los resultados de la dinámica del manipulador se explican mediante las ecuaciones (8), (9) y (10). Estas ecuaciones son lineales y las fuerzas necesarias para originar el movimiento están en función de las aceleraciones \ddot{d}_1 , \ddot{d}_2 y \ddot{d}_3 .

Tomando como referencia la figura 10 y las ecuaciones anteriores, se puede saber que a mayor aceleración del puente B o eje C, mayor será la fuerza requerida para originar el movimiento. Conociendo el valor de las fuerzas y el valor de los radios de los piñones de los motores, podemos saber los torques generados.

La figura 12 muestra el resultado del torque requerido por un motor para poner en movimiento horizontal al puente B a una determinada aceleración \ddot{d}_1 , de igual forma, la figura 13 muestra el resultado del torque necesario para poner en movimiento horizontal al eje C y finalmente la figura 14 para poner en movimiento vertical el mismo eje C.

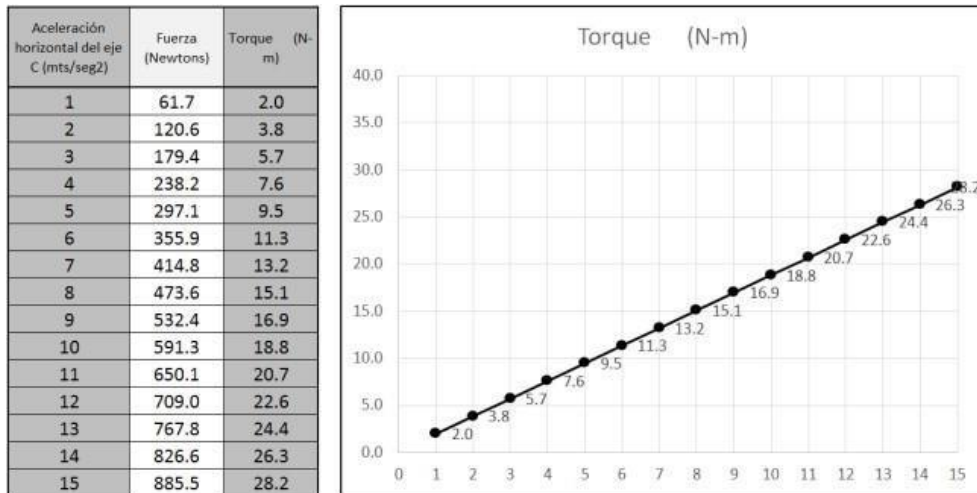


Figura 12. Resultado del torque del motor del puente B.

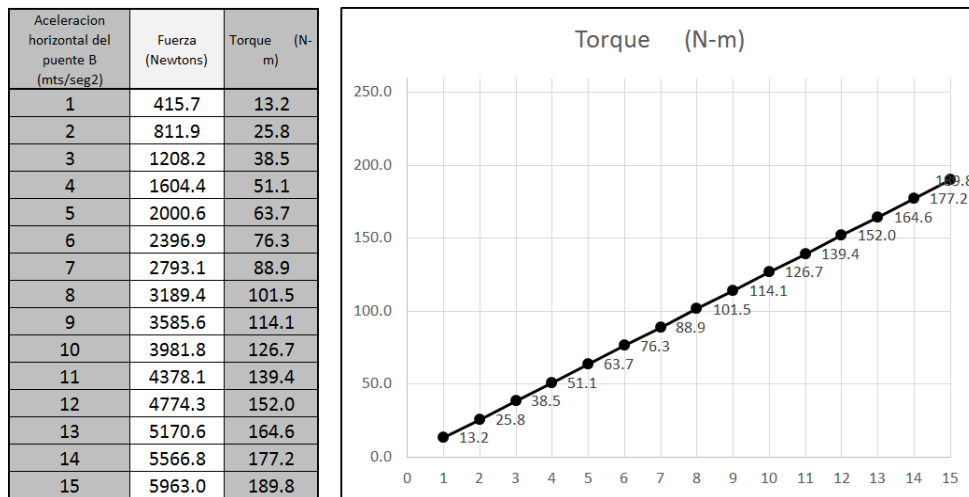


Figura 13. Resultado del torque del motor del eje C (Movimiento horizontal).

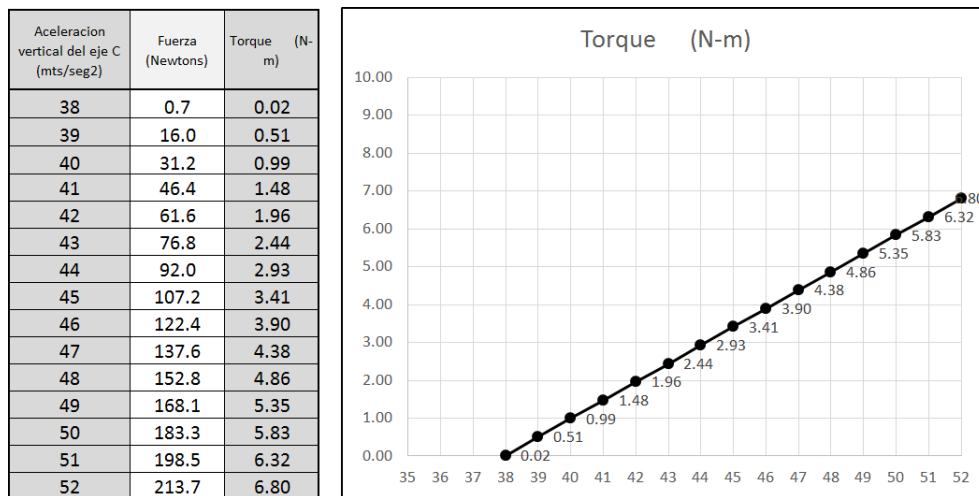


Figura 14. Resultado del torque del motor del eje C (Movimiento vertical).



Conclusiones

Para el diseño de un elemento mecánico del manipulador se deben considerar el factor de seguridad, la deformación y los ciclos de trabajo pronosticados. Para el caso específico de los componentes del manipulador los requerimientos del cliente fueron cumplidos. El uso del acero ASTM A- 36 redujo considerablemente el costo del proyecto y permitió homogenizar su uso para todos los componentes. La capacidad de los motores del manipulador estará en función de las aceleraciones del puente B y eje C. Se podrán seleccionar los motores tomando como referencia las figuras 12, 13 y 14. A mayor aceleración se necesitará mayor fuerza y por lo tanto mayor torque de los motores. La fuerza mínima y necesaria para mantener el movimiento del puente B y eje C es la indicada por las ecuaciones (5), (6) y (7) en ausencia de aceleración. Para la programación del

controlador en cuanto a la posición de la pinza o (“gripper”) y respecto a la posición “home”, se debe mantener la relación de las coordenadas cartesianas conforme a la expresión (2).

Referencias

- [1] F. Reyes-Cortes. *Robótica, control de robots manipuladores*, Editorial Alfa Omega, México, primera edición, 2011.
<https://www.alfaomega.com.mx/default/catalogo/profesional/robotica-control-de-robots-manipuladores.html>
- [2] R. L. Norton. *Diseño de máquinas un enfoque integrado*, Editorial Pearson, México, cuarta edición, 2011.
<https://www.pearsoneducacion.net/ecuador/tienda-online/dise%C3%B1o-maquinas-norton-4ed-ebook1>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y Adaptar el documento — remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)